

Numerical Analysis of Aerodynamic Characteristics of the Finned Surfaces with Cross-inclined Fins

Lagutin A. E., Stoyanov P. F.

Educational and Scientific Institute of Refrigeration Cryotechnologies Ecology and Energetic
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine

Abstract. This paper presents results of numerical research and analyses air-side hydraulic performance of tube bundles with cross inclined fins. The numerical simulation of the fin-tube heat exchanger was performed using the Comsol Femlab software. The results of modeling show the influence of fin inclination angle and tube pitch on hydraulic characteristics of finned surfaces. A series of numerical tests were carried out for tube bundles with different inclination angles ($\gamma = 90^\circ, 85^\circ, 65^\circ, 60^\circ$), the fin pitch $u=4$ mm. The results indicate that tube bundles with cross inclined fins can significantly enhance the average integral value of the air flow rate in channel between fins in comparison with conventional straight fins. Aerodynamic processes on both sides of modified channel between inclined fins were analyzed. The verification procedures for received results of numerical modeling with experimental data were performed.

Keywords: numerical research, aerodynamics, finned tubes, experiment, inclined fins, energy efficiency.

Analiza numerică a caracteristicilor aerodinamice ale suprafețelor cu nervuri inotatoare transversale înclinate

Lagutin A. E., Stoianov P. F.

Institutul de învățământ și științific de refrigerare, criotehnologii, ecoenergetică al Academiei Naționale de tehnologii alimentare din Odesa, Odesa, Ucraina

Rezumat. Această lucrare prezintă rezultatele experimentelor numerice pentru a studia dinamica caracteristicilor locale a presiunii fluxului în canalele amplasate între nervuri de configurație complexă. Studiul numeric al schimbătorului de căldură cu nervuri transversale este realizat în pachetul software Comsol Femlab. Rezultatele simulării au demonstrat influența unghiului de înclinare și de pas longitudinal al țevilor într-un mănunchi asupra caracteristicile aerodinamice ale suprafeței de schimb de căldură. Un șir de experimentele numerice a fost realizat pentru diferite unghiuri de înclinare a nervurilor ($\gamma = 90^\circ, 85^\circ, 65^\circ, 60^\circ$), pasul al nervurilor a fost egal cu $u = 4$ mm. Utilizarea suprafețelor de schimb de căldură cu nervuri transversale înclinate permite în comparație cu o suprafețe cu nervuri tradiționale creșterea fluxului de aer mediu în sens integral a vitezei fluxului în canalul între nervuri. Sunt investigate particularitățile de învăluire a fluxului de aer în canalului cu nervuri oblice. Este realizată verificarea rezultatelor obținute cu datele experimentale disponibile.

Cuvinte-cheie: aerodinamica, țeava cu nervuri, experiment, nervure oblice, eficiența energetică.

Численное исследование аэродинамических характеристик поверхностей теплообмена с поперечными наклонными ребрами

Лагутин А.Е., Стоянов П.Ф.

Учебно-научный институт холода, криотехнологий и экоэнергетики
Одесской национальной академии пищевых технологий, Одесса, Украина

Аннотация. В настоящей работе представлены результаты численного эксперимента по изучению динамики изменения локальных напорных характеристик потока в межреберных каналах сложной конфигурации. Численное исследование поперечно оребренного теплообменника выполнено в программном комплексе Comsol Femlab. Результаты моделирования выявили влияние угла наклона и продольного шага труб в пучке на аэродинамические характеристики поверхности теплообмена. Серия численных экспериментов была проведена для различных углов наклона ребер ($\gamma = 90^\circ, 85^\circ, 65^\circ, 60^\circ$), шаг ребер составлял $u=4$ мм. Использование поверхностей теплообмена с поперечными наклонными ребрами позволяет по сравнению с поверхностями с традиционным оребрением увеличить значение среднеинтегрального скоростного потока воздуха в межреберном канале. Исследованы особенности омыwania потоком воздуха противоположных сторон межреберного канала с наклонным оребрением. Проведена верификация полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Ключевые слова: аэродинамика, оребренная труба, эксперимент, наклонное оребрение, энергетическая эффективность.

Введение

Основной задачей при создании современных теплообменных аппаратов с воздушным охлаждением является повышение их энергетической эффективности. При эксплуатации воздушных теплообменников теплоносители, между которыми происходит теплообмен, имеют различные теплофизические свойства. Это влияет на интенсивность процесса теплопередачи и соответственно на габариты аппарата. Увеличение теплосъема и компактности теплообменников осуществляется за счет использования оребренных труб. Поперечное расположение ребер относительно оси труб в наибольшей степени способствует условию выравнивания термических сопротивлений на сторонах теплообмениваемых сред и снижению расходов дорогостоящих цельнотянутых труб, обеспечивая при этом оптимальные массогабаритные характеристики аппаратов [1,6-9,17]. Существующее разнообразие размеров и форм оребренных поверхностей свидетельствует о широте изыскательских работ по усовершенствованию воздушных теплообменников.

Изучить динамику изменения локальных характеристик потока в межреберных каналах сложной конфигурации методами физического моделирования достаточно проблематично, как с точки зрения постановки эксперимента, так и вследствие отсутствия необходимого аппаратного обеспечения.

Применение новейших программ численного анализа физических явлений методом конечных элементов открыло большие возможности и перспективы для исследователей. Следовательно, решая вопрос усовершенствования поверхностей теплообмена аппаратов воздушного охлаждения, целесообразным является использование достижений в области моделирования физических явлений.

Целью численного моделирования термогидравлических процессов, происходящих при обтекании потоком воздуха оребренных поверхностей, являлось подтверждение частных выводов, представленных в работах [12,13-16] и изучение особенностей течения потока воздуха в межреберном канале при варьировании основных конструктивных параметров поверхности теплообмена.

Для решения поставленных задач необходимо:

- провести визуализацию аэродинамических процессов при обтекании поверхности теплообмена;

- выявить основные факторы, влияющие на параметры тепловых и аэродинамических характеристик поверхности;

- провести верификацию полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Расчетные комплексы численного моделирования позволяют исследователю проводить расчет широкого спектра физических задач. Интерфейс программных комплексов дает возможность пользователю задавать геометрию исследуемых объектов, начальные и граничные условия, настраивать параметры решателя и т.д.

В настоящей статье компьютерное моделирование реализовано в программе Comsol Femlab 3.3a. При проведении численного моделирования пользователь имеет возможность не только получать среднеинтегральные значения анализируемых параметров, но и проводить визуализацию изучаемых физических явлений. Здесь визуализация при анализе физических явлений переходит от иллюстративного средства к полноценному инструменту познания сути физических процессов.

При моделировании физических процессов в теплообменных аппаратах с воздушным охлаждением, визуализация позволяет исследователю:

- провести качественный анализ полученных результатов;

- выявить характерные особенности физических процессов;

- наглядно представить результаты исследования.

В настоящей работе проанализирована динамика течения воздуха в межреберном канале конвективной поверхности теплообмена с наклонным оребрением. Ранее проведенные экспериментальные и аналитические исследования вопроса использования поверхностей теплообмена с наклонным оребрением [12,13-16] подтвердили высокие тепловые характеристики данных систем теплообмена. Учитывая специфику течения теплоносителя в межреберном канале сложной конфигурации в данной работе по результатам численного моделирования исследовано изменение скоростного напора воздуха на противоположных сторонах межреберного

канала и по окружности трубы у основания ребер.

Результаты исследований пакетов труб

Основное термическое сопротивление теплопереносу при обтекании теплообменной поверхности потоком теплоносителя связано с толщиной пограничного слоя. Турбулентный поток воздуха, омывающий поверхность теплообменного аппарата характеризуется значением среднеинтегральной скорости, пространственным ее распределением и наличием пульсаций потока. Протекающие в пограничных тепловом и гидродинамическом слоях процессы сводятся к переносу тепла и импульса, что в свою очередь определяет тепловые и аэродинамические характеристики теплообменной поверхности.

Степень турбулентности потока оказывает существенное влияние на тепловые показатели поверхностей теплообмена. Турбулентное движение потока теплоносителя характеризуется сложным вихревым движением,

характерной чертой которого является способность передавать большие напряжения сдвига и обеспечивать быстрый перенос импульса и тепла [1].

Исходя из многообразия моделей турбулентности, следует заметить, что ни одна из известных моделей не является универсальной для всех классов инженерных задач. Среди всех моделей турбулентности выделим семейство k-е моделей турбулентности, которые давно и успешно используются в расчетной практике. Модели k-е отличаются высокой работоспособностью, оптимальным использованием вычислительных ресурсов и приемлемой точностью получаемых результатов [2,16,18].

Для расчета течения потока воздуха в межреберном канале была использована k-е Turbulence Model. Она представляла собой уравнение Навье-Стокса и зависимые переменные: кинетическую энергию турбулентности k, (turbulence kinetic energy) и скорость диссипации турбулентности ε, (dissipation rate of turbulence energy):

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla \cdot \eta \cdot (\nabla u + (\nabla u)^T) + \rho \cdot (u \cdot \nabla) u + \nabla p = F \\ \rho \cdot \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\delta_k} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho \cdot U \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \cdot \eta_T \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \cdot \varepsilon \\ \rho \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \rho \cdot U \cdot \nabla \varepsilon = \frac{1}{2} \cdot C_{\varepsilon 1} \cdot \eta_T \cdot (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \cdot C_{\varepsilon 2} \cdot \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (1)$$

k-е Turbulence Model базируется на нескольких допущениях, из которых отмечено, что число Рейнольдса является достаточно высоким и турбулентность в пограничном слое находится в равновесии, то есть генерация энергии равняется ее диссипации [2,3,18].

Турбулентная вязкость определялась по уравнению:

$$\eta_T = \rho \cdot c_\mu \cdot k^2 / \varepsilon \quad (2)$$

где c_μ - константа модели.

Уравнение переноса для кинетической энергии турбулентности k может быть получено путем взятия следа уравнений для напряжений Рейнольдса [9]:

$$\rho \cdot \frac{\partial k}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\delta_k} \right) \cdot \nabla k \right] + \rho U \cdot \nabla k = \frac{1}{2} \cdot \eta_T (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho \varepsilon \quad (3)$$

где δ_k - константа уравнения.

Уравнение для скорости диссипации турбулентности ε может быть получено аналогично. Полученное уравнение имеет вид [9]:

$$\rho \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \nabla \cdot \left[\left(\eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \cdot \nabla \varepsilon \right] + \rho U \cdot \nabla \varepsilon = \frac{1}{2} \cdot C_{\varepsilon 1} \cdot \eta_T (\nabla U + (\nabla U)^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

где $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_ε - константы модели.

При выборе соответствующей модели турбулентности анализировались особенности движения жидкости, необходимая точность решения и доступные вычислительные ресурсы. Различные модели турбулентности дают отличные результаты при моделировании отрывных течений в пограничных слоях. Точность результатов моделирования зависит от шага расчетной сетки в пристеночном слое ячеек (обычно характеризуется параметром y^+ , который можно рассматривать как локальное число Рейнольдса в элементарном объеме).

Расчетная сетка создавалась непосредственно в пакете программных комплексов численных моделей физических явлений. Для сокращения количества элементов конечно-элементной сетки (КЭС) симметричного объекта, расчет был выполнен для одной его симметричной части. Это позволило получить адекватную картину физического процесса при существенном сокращении потребного расчетного времени. Увеличение числа расчетных ячеек модели задавалось как в объеме, так и на поверхности. Технология подсеточного разрешения геометрии объекта позволила автоматически воспроизводить сложную форму поверхности конечно-элементной модели.

Параметры решающего устройства выбирались индивидуально для каждого типа физической задачи. В зависимости от типа задания (линейная, нелинейная, упруго-пластичная и т.д.) использовался тот или иной решатель. Итерационные решатели потребляли меньше машинной памяти, но при этом контролировалась сходимость решения и при необходимости, изменяли количество итераций.

Анализ работ, посвященных численному моделированию показывает, что при использовании весьма грубой разбивки, но с высокой мерой аппроксимирующего полинома, (например, полином 4-ой степени), выходит практически точное решение. При увеличении числа элементов при более высокой степени полинома решение несущественно уточняется, однако время решения задачи возрастает в несколько раз. Полиномы выше

четвертой степени использовать нерационально, поскольку уменьшается сходимость решения задачи. Это связано, по-видимому, с накоплением вычислительной погрешности [4,10,18].

Течение потока воздуха в межреберном канале теплообменной поверхности представляет собой довольно сложный физический процесс, при протекании которого интенсивность процессов теплообмена неразрывно связана с аэродинамическими особенностями течения теплоносителя. Возникновение зон повышенной турбулентности потока в межреберном канале приводит к локальному повышению коэффициентов теплоотдачи, за счет разрушения теплового пограничного слоя. Обтекание потоком воздуха исследуемой трубчато-ребристой поверхности с наклонным оребрением сопровождается формированием иной структуры потока теплоносителя в межреберной полости. В работе [5], посвященной изучению особенностей течения потока газа в межреберном канале поверхностей с наклонным оребрением, приведены результаты численного решения сопряженной тепло-аэродинамической задачи. Решение сопряженной задачи проведено для разнообразных вариантов конструктивного исполнения оребрения. По результатам проведенного численного эксперимента было показано, что характер обтекания противоположных сторон межреберного канала весьма отличается.

При проведении натурных испытаний механизм повышения тепловой эффективности труб с наклонным оребрением недостаточно изучен. Это связано прежде всего со сложностью экспериментального получения данных, характеризующих тепло-аэродинамические флуктуации течения потока газа в межреберном канале. Программные комплексы позволяют проводить виртуальные исследования при различных начальных и граничных условиях, геометрических параметрах и формах межреберных каналов воздушных теплообменников и эффективно проводить такой многопараметрический анализ моделируемых систем.

Обтекание потоком воздуха коридорных пучков труб приближается к течению в прямолинейном канале, а распределение скоростей в наименьшем сечении следующего ряда в значительной мере зависит от взаимного расположения труб в пучке. Тепловые и аэродинамические характеристики коридорных пучков труб уступают шахматным пучкам

[1,6-9], которые отличаются большей степенью турбулизации потока теплоносителя.

Одиночный трехтрубный элемент пакета оребренных труб представлен на рис.1. Принятые обозначения (рис.1): $d_{тр}$ - наружный диаметр трубы, S_2 - продольный шаг труб в пучке, γ - угол наклона ребер относительно оси трубы, u - шаг ребер.

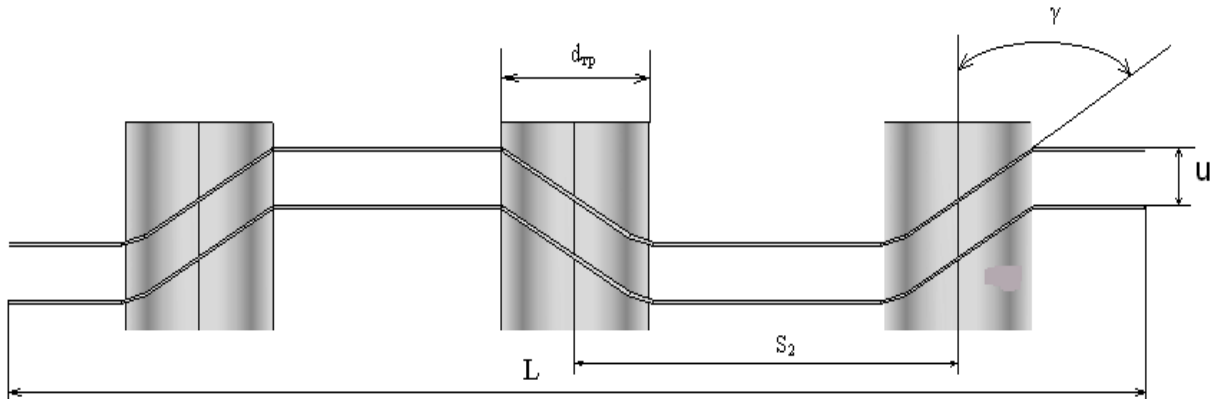


Рис.1. Одиночный трехтрубный элемент пакета оребренных труб.

Численное моделирование позволило проанализировать условия течения потока воздуха в межреберном канале, его структуру и степень турбулентности. Исследование проведено при изменении относительного продольного шага труб пакета в диапазоне $S_2/d_{тр} = 2,56 \div 3,22$ и угла наклона ребер относительно оси трубы $\gamma = 60^\circ \div 90^\circ$. Для всех рассмотренных случаев оставались неизменными наружный диаметр труб $d_{тр} = 18$ мм, шаг ребер $u = 4$ мм, высота ребра $h_p = 14$ мм.

При переходе на поверхности с криволинейным межреберным каналом на базе применения наклонного оребрения наступает повышение эффективности теплообмена даже при использовании худшего варианта компоновочного решения - коридорных пучков труб. Для анализа эффекта повышения тепловой эффективности выполнено исследование влияния конструктивного исполнения наклонного оребрения на условия течения потока теплоносителя в межреберном канале.

В ходе компьютерного моделирования была изучена структура потока в широком диапазоне значений наклона ребер относительно осевой линии несущих труб (90° , 85° , 65° и 60°) при различных вариантах относительных продольных шагов труб в пучке ($S_2/d_{тр} = 2,56 \div 3,22$). При сопоставлении различных вариантов конструктивного исполне-

ния оребрения определено изменение скоростного поля потока теплоносителя по длине межреберного канала по средней линии трехтрубного элемента (рис.2), рассмотрены зоны возникновения пульсаций и области пониженного скоростного напора, сопоставлена динамика изменения скоростного напора по длине межреберного канала для противоположных сторон канала. Зона исследования изменения скоростного напора соответствовала симметричной части межреберного канала.

В результате проведенных расчетов построены графики изменения скорости потока воздуха по длине межреберного канала L (рис.3). Характер распределения скоростного потока по длине межреберного канала при $\gamma = 90^\circ$ (рис.3а) соответствует данным исследований других авторов [1,7]. При коридорной компоновке труб, область межреберного канала, в которой наблюдаются пониженные скоростные значения потока воздуха, связана с возникновением дорожки Кармана формирующейся за предшествующей теплообменной трубой. Следовательно, эта зона межреберного канала отличается малой интенсивностью процесса теплообмена между воздухом и поверхностью.

Переход к криволинейному межреберному каналу за счет наклона ребер позволяет увеличить локальную скорость потока тепло-

носителя в "теневой" зоне за теплообменной трубой (рис.3б).

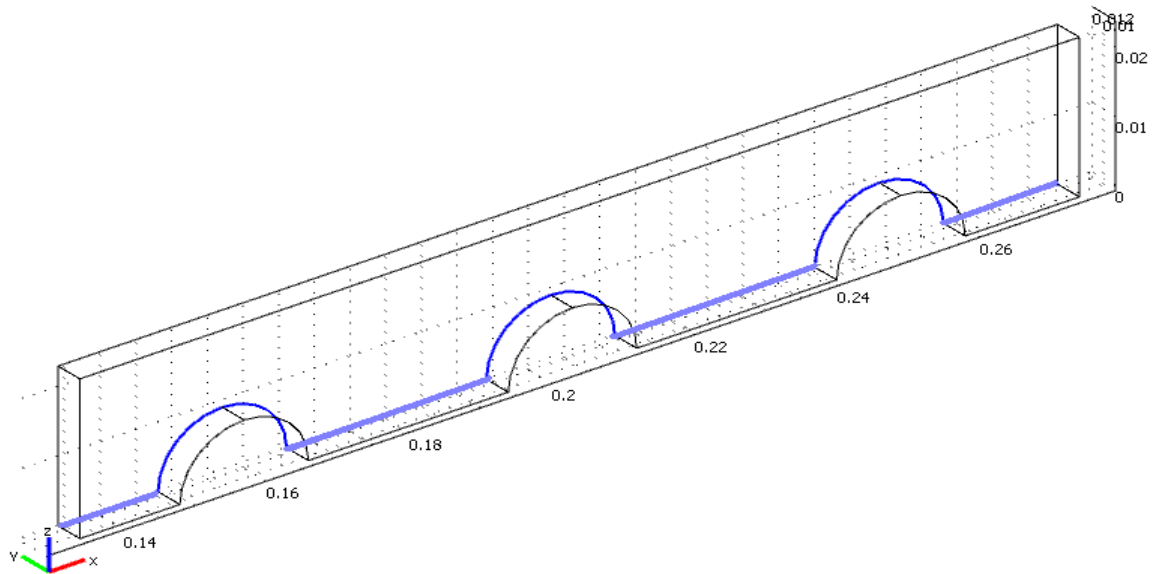


Рис. 2. Линия фиксации скоростного поля потока воздуха.

Величина наклона ребрения анализировалась до значения угла наклона ребер $\gamma=60^{\circ}$. Дальнейшее уменьшение угла наклона ребер нецелесообразно ввиду создания условий, при которых течение теплоносителя сопровождается увеличением гидравлического сопротивления. Анализ скоростных показателей и характера изменения скоростного напора на противоположных сторонах межреберного канала приведен на рис.4.

При наложении скоростных характеристики противоположных сторон межреберного канала традиционного конструктивного исполнения (рис. 4а) видно, что характер распределения скоростных показателей потока совпадает. Исследования характера скоростного потока по двум сторонам криволинейного межреберного канала показали, что отличия в значениях скорости потока на стенках канала достигает в экваториальной зоне ребра до 7%, а в кормовой части – до 30% (рис.4б). Это вероятно связано, с прохождением потока через криволинейные участки межреберного канала, на которых происходит изменение направления движения потока воздуха.

Анализируя динамику изменения скоростного поля потока по длине канала (рис.3,4), можно утверждать, что на распределение скоростей по глубине пучка оказывают существенное влияние впереди стоящие трубы.

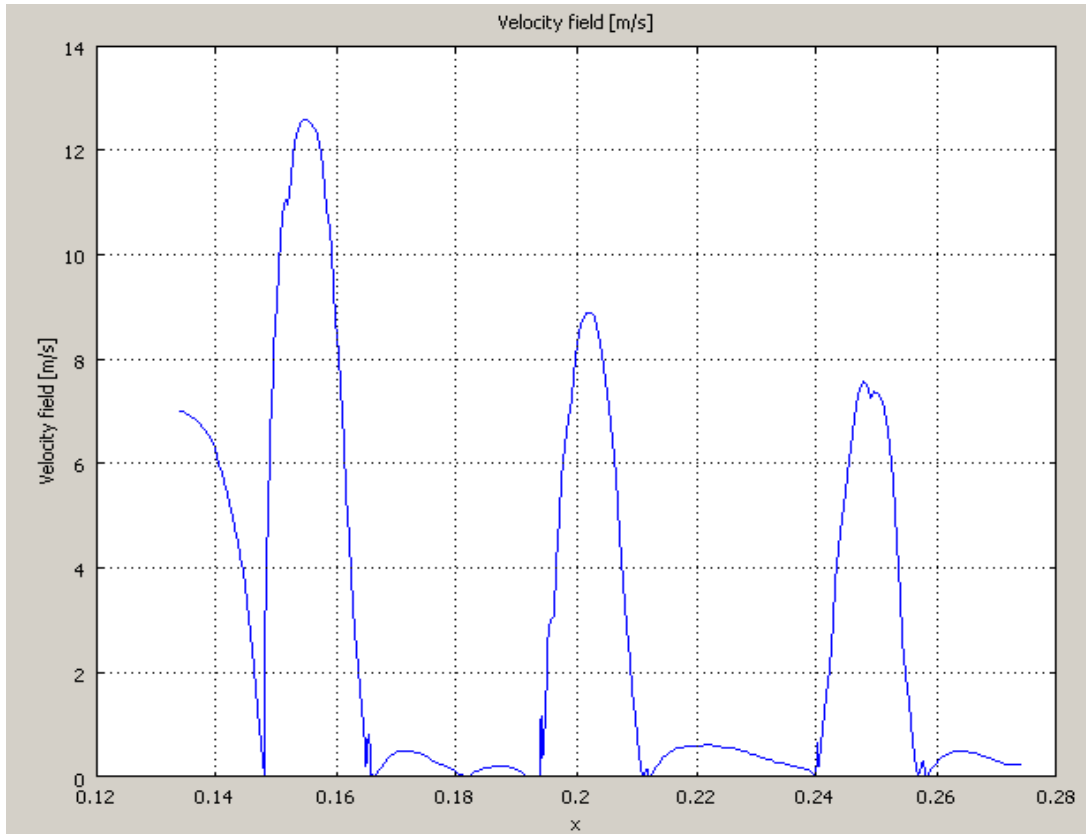
Кормовая часть ребра при этом омыва-

ется рециркуляционным потоком. При переходе на криволинейный канал ($\gamma=85^{\circ}\div 60^{\circ}$) происходит повышение среднеинтегральных значений скорости потока воздуха в межреберном канале, что приводит в конечном итоге к повышению тепловой эффективности поверхности теплообмена.

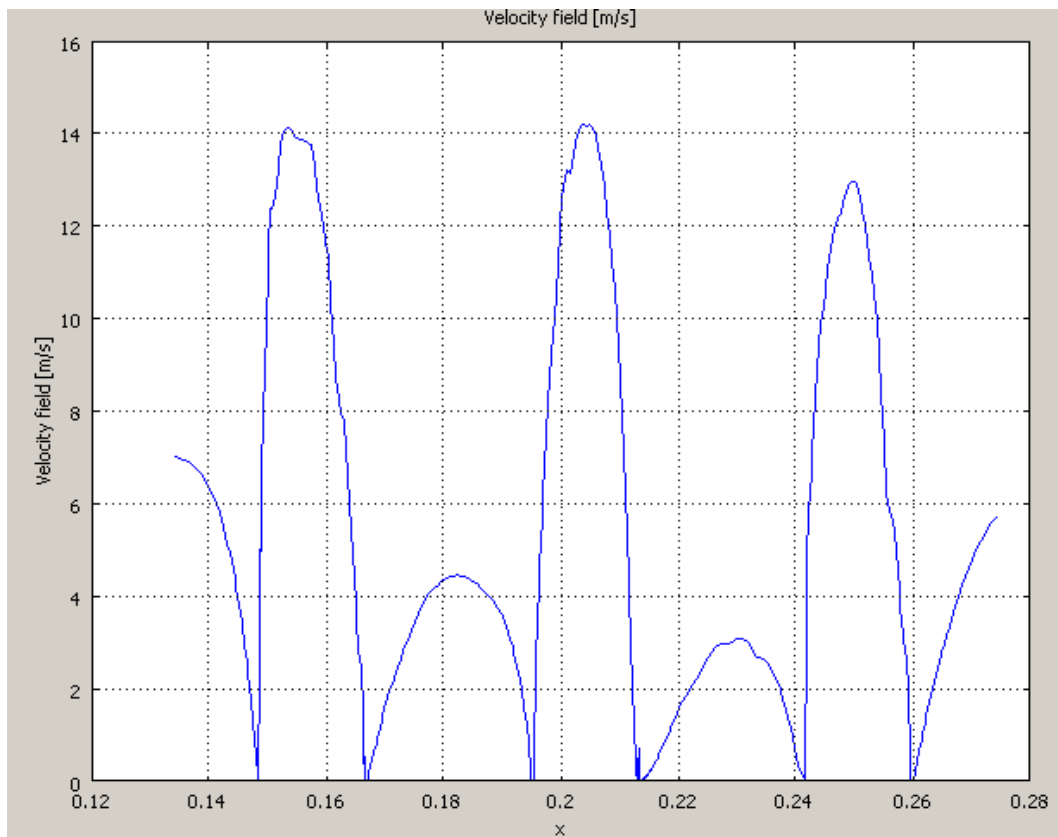
Исследование скоростных характеристик потока теплоносителя позволило изучить динамику изменения характеристик потока по осевой линии межреберного канала в зависимости от его конструктивного исполнения. Переход к криволинейной конфигурации межреберного канала позволяет дополнительно интенсифицировать поток теплоносителя, а также улучшить обтекание теплоносителем «теневых» зон поверхности ребра.

При коридорной компоновке трубы второго и последующих глубинных рядов затеваются первым рядом, поэтому теплоотдача первого ряда максимальна. При течении теплоносителя в криволинейном межреберном канале коридорного пучка труб происходит выравнивание скоростного поля потока по глубине межреберного канала (рис.3,4).

Описанный характер изменения скоростного напора по глубине межреберного канала сохраняется во всем диапазоне изменения относительного продольного шага труб пакета ($S_2/d_{tp}=2,56\div 3,22$).



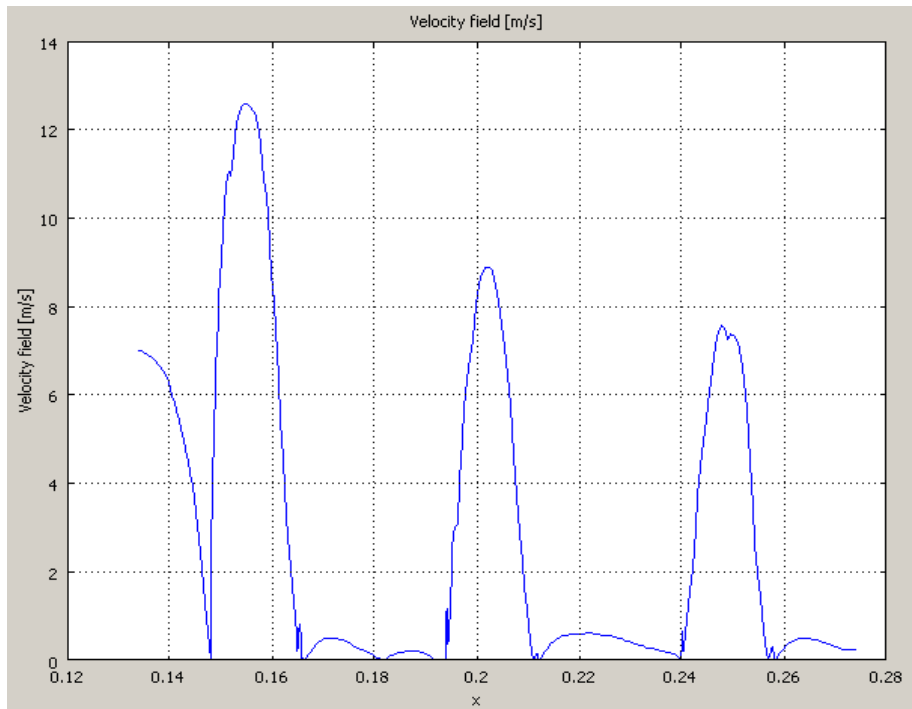
a)



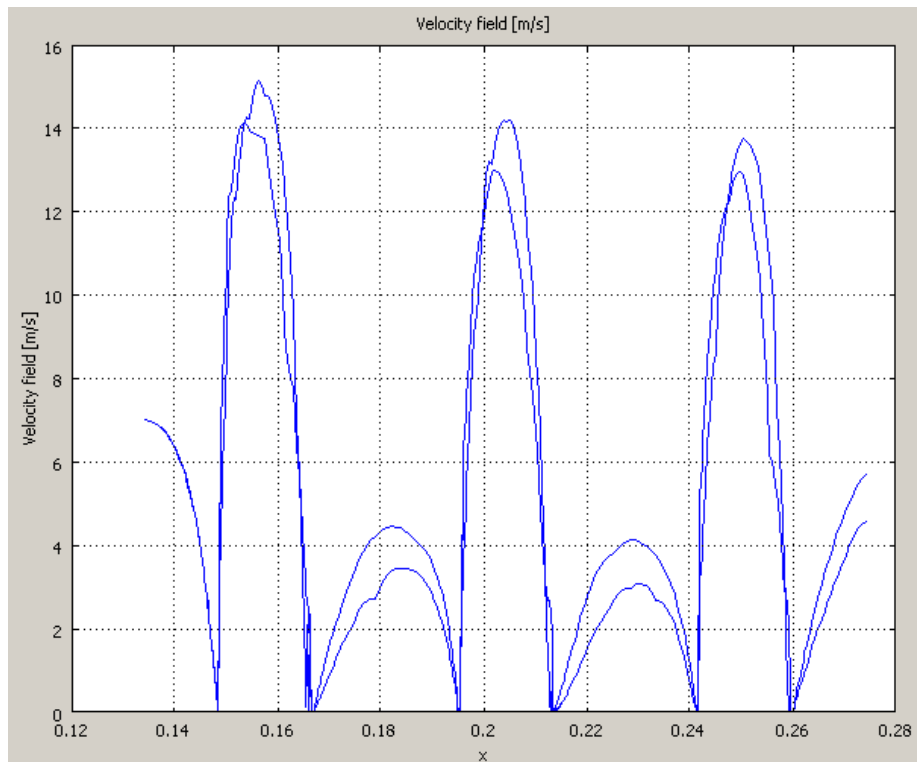
б)

а) – угол наклона ребра $\gamma=90^\circ$; б) - угол наклона ребра $\gamma=60^\circ$

Рис.3. График изменения скорости воздуха по длине межреберного канала.

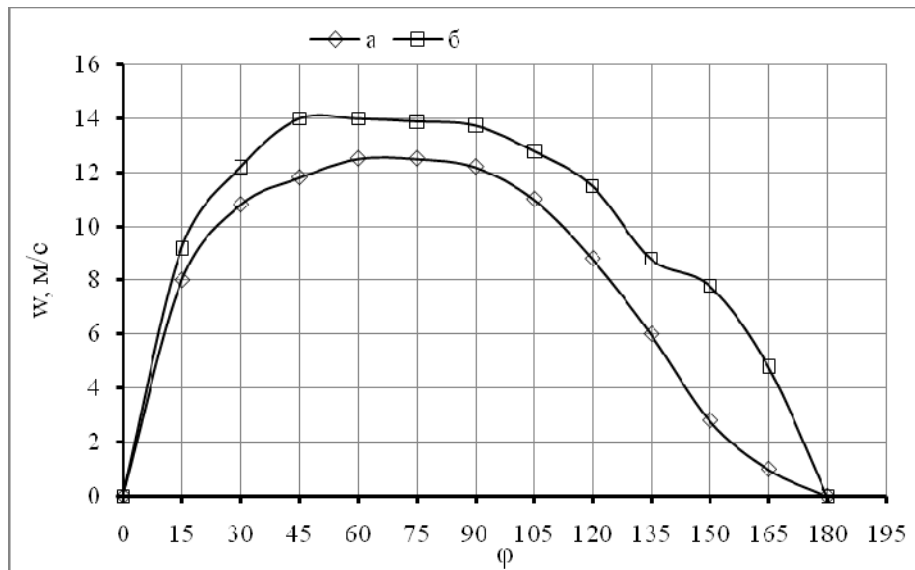


a)



б)

a) – угол наклона ребра $\gamma=90^\circ$; б) - угол наклона ребра $\gamma=60^\circ$
Рис.4. Изменения скоростного напора воздуха на противоположных сторонах межреберного канала.



а) – угол наклона ребра относительно осевой линии трубы $\gamma=90^0$;
б) - угол наклона ребра относительно осевой линии трубы $\gamma=60^0$

Рис.5. Изменения скоростного напора потока воздуха по окружности трубы у основания ребер.

Изменения скоростного напора потока воздуха по окружности трубы у основания ребер при традиционном ($\gamma=90^0$) и наклонном ($\gamma=60^0$) их расположении относительно оси трубы, представлено на рис. 5.

Анализируя характер обтекания несущих ребер труб (рис.5) приходим к выводу, что в случае использования наклонных ребер, изменения скоростного напора потока воздуха по окружности трубы у основания ребер наиболее ощутимы в его кормовой зоне. Отмеченный эффект при использовании наклонного ребрения приводит к улучшению условий обтекания потоком воздуха "застойной" кормовой зоны ребра. Результаты проведенного исследования для традиционного ребрения ($\gamma=90^0$) согласуются с результатами экспериментального исследования [1], а также данными литературных источников [10,11].

Выводы

Получены данные по динамике течения потока воздуха в межреберном канале поверхности теплообмена с угловой посадкой ребер. Выявлено, что характер изменения скоростного напора на противоположных сторонах межреберного канала трехтрубной системы с наклонным ребрением ($\gamma=60^0; 65^0; 85^0$) существенно отличен от обтекания традиционных поверхностей теплооб-

мена ($\gamma=90^0$) и переход к поверхностям с наклонным ребрением приводит к увеличению скорости потока в застойных "теневых" зонах при коридорной компоновке пучка труб. Данный фактор обусловлен сложной конфигурацией межреберного канала с наклонным ребрением, за счет которой производится "вдув" потока воздуха в застойные зоны. По результатам проведенного численного моделирования выявлено, что уже при угле наклона ребра $\gamma=85^0$ среднеинтегральное значение скорости потока воздуха в межреберном канале существенно увеличивается и ощущимо турбулизируется вихревая дорожка за теплообменной трубой. Результаты проведенного численного эксперимента верифицированы, полученные данные согласуются с эмпирическими результатами ранее проведенных исследований.

Литература (References)

1. Zhukauskas A.A. *Konvektivnyj perenos v teploobmennikax* [Convective mass transfer in heat exchangers]. Moscow: Nauka, 1982. 472 p.
2. COMSOL Multiphysics Modeling Guide. – Version: October 2007, COMSOL 3.4.
3. Biryulin G.V. *Teplofizicheskie raschety v konechno-elementnom pakete Comsol Femlab* [Thermal calculations in finite element package COMSOL / FEMLAB], 2006. 78 p.
4. Leont'ev V.V. *Skhodimost' i tochnost' metoda konechnyh elementov pri reshenii ploskoi uprugoi i uprugo-plasticheskoj zadach v Femlab* [Convergence

and accuracy of finite element method in solving dimensional elastic and elastic-plastic problem in Femlab]. *Visnik derjavnogo Sevastopolskogo tehničnogo universitetu*. no. 88: *Mehanika, energetika, ekologija*, 2008, 26-29. (in Russian).

5. Hacı Mehmet Sahin, Ali Rıza Dal, Esref Baysal 3-D Numerical study on the correlation between variable inclined fin angles and thermal behavior in plate fin-tube heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 27 (2007), 1806–1816.

6. Antuf'ev V. M., Beleckiy G. S. *Teploperedacha i aerodinamicheskoe soprotivlenie trubchatyh poverhnostey v poperechnom potoke* [Heat transfer and aerodynamic pressure drop of tube surfaces in cross-flow]. Moscow, 1948. 119 p.

7. Migai V.K. *Modelirovanie teploobmennogo energeticheskogo oborudovaniya* [Modeling of heat exchange power equipment]. Leningrad: 1987. 287p.

8. Pismennyi E.N. *Raschet konvektivnykh poperechno-orebrennykh poverhnostei nagreva* [Heat exchange and aerodynamics of packages cross finned pipes]. Kiev, 2003. 184 p.

9. Yudin V.F. *Teploobmen poperechno – orebrennykh trub* [Heat exchange cross finned pipes], 1982. 189 p.

10. Comini G., Nonino C. and Savino S. Convective heat and mass transfer in wavy finned-tube exchangers. *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow*, Vol. 12 No. 6, 2002, 735-755.

11. El Sherbini A.I., Jacobi A.M., Hrnjak P.S. Experimental investigation of thermal contact resistance in plain-fin-tube evaporators with collarless fins. *International Journal of Refrigeration* 26 (2003), 527 – 536.

12. Stoianov P.F., Lagutin A.S. Improvement of finned heat-exchange compressor surfaces. *Proc. of the*

Conference "Compressors-2009". – 2009. (Slovak Republic), 398- 403.

13. Knyazyuk V. I., Lagutin A. E., Stoyanov P. F. *Issledovanie teplovykh karakteristik paketov trub s poperechnymi naklonnymi rebrami* [Research of thermal characteristics of a package of pipes with transverse inclined fins]. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*, 2013, №1 (141), pp. 5-9 (in Russian).

14. Lagutin A. E., Knyazyuk V. I., Stoyanov P. F. *Issledovanie aerodinamicheskogo soprotivleniya paketov trub s poperechnymi naklonnymi rebrami* [Heat exchange and aerodynamics of the combined tubing bundles with cross inclined fins]. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*, 2012, №1 (135), 28-32 (in Russian).

15. Stoyanov P.F., Lagutin A.E. *Teplo-aerodinamicheskie kharakteristiki poperechno-orebrennykh puchkov trub* [Heat-aerodynamic characteristics of cross-fin tube bundles]. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, №4(126), 28-33. (in Russian).

16. Stoyanov P.F., Lagutin A.E. *Chislennoe modelirovanie obtekaniya poperechno orebrennoi poverkhnosti teplootvoda* [Numerical simulation of flow cross-finned heat sink surface]. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*, 2010, №2 (124), 35-41 (in Russian).

17. Lagutin A.E, Stoyanov P.F. *Ocenka teplovoj effektivnosti trub s poperechnymi rebrami* [Assessment of thermal efficiency tubes with transverse fins]. *Kholodil'naya tekhnika i tekhnologiya*, Tom 51, Vol.1, 2015, 25-30 (in Russian).

18. Shobhana Singh, Kim Sørensen, Thomas Condra *Multiphysics numerical modeling of a fin and tube heat exchanger*. *Proceedings of the 56th SIMS October 07-09, 2015, Linköping, Sweden*, 383-390.

Сведения об авторах.



Лагутин Анатолий Ефимович, докт. техн. наук, профессор кафедры холодильных установок и кондиционирования воздуха Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: теплообменные аппараты энергетических и технологических систем, аудит охлаждающих систем в агропромышленном комплексе и химической промышленности.
E-mail: ae_lagutin@meta.ua



Стоянов Павел Фомич к.т.н., старший преподаватель кафедры холодильных установок и кондиционирования воздуха Института холода, криотехнологий и экоэнергетики Одесской национальной академии пищевых технологий. Область научных интересов: теплообменные аппараты энергетических и технологических систем, численное моделирование, теплообмен, аэродинамика, тепловые насосы.
E-mail: palfomich@gmail.com